

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	1
1.1. Konzentrationsmaße	1
1.2. Signifikante Stellen	2
1.3. Beispiele	5
2. Thermodynamik I: Grundbegriffe	7
2.1. Allgemeines	7
2.2. Energieerhaltung und Energieumwandlung	8
2.2.1. Erster Hauptsatz für geschlossene Systeme	8
2.2.2. Erster Hauptsatz für offene Systeme	9
2.2.3. Energieformen und ihre Berechnung	10
2.2.4. Zweiter Hauptsatz	17
2.2.5. Zusammenstellung der Berechnungsmöglichkeiten für die Enthalpie und Entropie	18
2.3. Gleichgewichtszustände	19
2.3.1. Zustandsgleichungen	20
2.3.2. Phasengleichgewichte	21
2.3.3. Reaktionsgleichgewichte	25
2.4. Beispiele	31
3. Grundlagen Wärme-, Stoff- und Impulstransport	53
3.1. Einleitung: Mechanismus	53
3.2. Transportgrößen	54
3.3. Konduktive Transportvorgänge	56
3.3.1. Instationäre Transportvorgänge	57
3.3.2. Transportkoeffizienten (Leitwerte) und Ausgleichskoeffizienten	57
3.3.3. Einseitige Diffusion	59
3.3.4. Nicht äquimolare Diffusion	59
3.4. Konvektive Transportvorgänge	60
3.4.1. Laminare und turbulente Strömung, Pfropfenströmung	64
3.4.2. Film-Theorie	66
3.4.3. Grenzschichten	68
3.4.4. Analogie	69
3.5. Wärme- und Stoffdurchgang	70
3.5.1. Berechnung von Wärmeaustauschern	72
3.6. Wärmestrahlung	72
3.7. Beispiele	74
4. Bilanzen	100
4.1. Grundlagen	100
4.1.1. Bilanzgrößen	100
4.1.2. Bilanzgebiet	100
4.1.3. Allgemeine Bilanzgleichungen	101
4.2. Stoffbilanzen	102
4.2.1. Transportterme	102
4.2.2. Speicherterm	102
4.2.3. Generationsterm	103
4.2.4. Bilanzgleichungen	103

4.2.5.	Atombilanzen	105
4.3.	Energiebilanzen	105
4.4.	Impulsbilanzen	107
4.4.1.	Berücksichtigung von Feldgrößen	109
4.5.	Entropiebilanzen	111
4.5.1.	Exergiebilanzen	112
4.6.	Zusammenstellung der integralen Bilanzgleichungen	113
4.7.	Anlagenbilanzen	114
4.7.1.	Freiheitsgradanalyse	115
4.7.2.	Lösen des Gleichungssystems	117
4.8.	Beispiele	118
4.8.1.	Stoffbilanzen	118
4.8.2.	Energiebilanzen	130
4.8.3.	Impulsbilanzen	160
4.8.4.	Entropie- und Exergiebilanzen	168
4.8.5.	Anlagenbilanzen	171
5.	Druckverlust	194
5.1.	Druckverlust in Rohrleitungen	194
5.1.1.	Gerade Leitungsabschnitte	194
5.1.2.	Gekrümmte Leitungsabschnitte	198
5.1.3.	Rohrleitungseinbauten	200
5.1.4.	Anlagendruckverlust	205
5.1.5.	Offene Kanäle	205
5.2.	Druckverlust bei der Durchströmung von Haufwerken	206
5.2.1.	Kuchenfiltration	206
5.2.2.	Tiefenfiltration	209
5.3.	Fließbett / Wirbelschicht	210
5.4.	Druckverlust in Stoffaustauschkolonnen	211
5.4.1.	Druckverlust in Benetzungskolonnen	211
5.4.2.	Druckverlust an Kolonnenböden	215
5.5.	Zyklon	217
5.6.	Beispiele	219
6.	Partikelgrößen und Partikelgrößenverteilungen	239
6.1.	Partikeleigenschaften	239
6.1.1.	Partikelgröße	239
6.1.2.	Partikelform	240
6.1.3.	Partikelverteilungen	240
6.2.	Trennen von Partikeln	245
6.2.1.	Begriffe und Definitionen	245
6.3.	Beispiele	247
7.	Partikeltrennverfahren	259
7.1.	Sedimentation	259
7.1.1.	Stationäre Sedimentation kugelförmiger Einzelpartikel	259
7.1.2.	Stationäre Sinkgeschwindigkeit von nicht kugelförmigen Partikeln und Partikelschwärmen	262
7.1.3.	Auslegung Sedimentationsbecken	262
7.1.4.	Instationäre Sedimentation	263

7.2.	Partikelabscheidung im Zyklon.....	264
7.3.	Beispiele:.....	265
8.	Thermische Trennverfahren I.....	276
8.1.	Einstufige Trennoperationen	276
8.1.1.	Theoretische Stufe	276
8.1.2.	Gleichgewichtsgesetze für physikalisch wirkende Trennverfahren	276
8.1.3.	Trennverfahren mit chemischer Reaktion	278
8.1.4.	Beispiele zu einstufigen Trennoperationen	278
8.2.	Mehrstufige Gegenstromoperationen	293
8.2.1.	Beispiele zu mehrstufigen Trennoperationen	295
9.	Wässrige Lösungen	301
9.1.	ideal verdünnte Lösungen.....	301
9.1.1.	Ionenprodukt Wasser.....	301
9.1.2.	Säuren und Basen, pH-Wert Berechnungen	305
9.1.3.	Lösungs- und Fällungsreaktionen, Komplexbildung.....	306
9.1.4.	Gase	307
9.2.	Berücksichtigung von Aktivitätskoeffizienten	308
9.2.1.	Allgemeines.....	308
9.2.2.	Arten von Aktivitätskoeffizienten	308
9.2.3.	Die Debye-Hückel Theorie.....	309
9.2.4.	Erweiterung der Debye-Hückel-Theorie ohne Berücksichtigung von Nahwirkungen	310
9.2.5.	Erweiterung der Debye-Hückel-Theorie mit Berücksichtigung von Nahwirkungen ..	311
9.3.	Elektrochemie.....	312
9.4.	Beispiele:.....	315
10.	Chemische Kinetik	337
10.1.	Bestimmung von Reaktionsordnungen.....	339
10.1.1.	irreversible Reaktion $A \rightarrow \text{Produkte}$	339
10.1.2.	irreversible Reaktion $a A + b B \rightarrow \text{Produkte}$	339
10.1.3.	reversible Reaktion $a A + b B \leftrightarrow c C + d D$	339
10.1.4.	irreversible Parallelreaktionen	340
10.1.5.	irreversible Folgereaktionen	340
10.2.	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante	341
10.3.	Enzymkinetik.....	342
10.4.	Beispiele	344
11.	Reaktionstechnik	352
11.1.	Begriffe und Definitionen.....	352
11.2.	Bilanzgleichungen für isotherme ideale Reaktoren	353
11.2.1.	Diskontinuierlicher Rührkessel	353
11.2.2.	Kontinuierlicher Rührkessel (kRK).....	354
11.2.3.	Ideales Strömungsrohr.....	354
11.2.4.	Schlaufenreaktor, Kreislaufreaktor.....	355
11.2.5.	Rührkesselskaskade	356
11.2.6.	Strömungsrohr und Rührkessel	357
11.2.7.	Gleichungen bei Änderung des Reaktionsvolumens	357
11.3.	Verweilzeitverteilung in idealen Reaktoren	358
11.3.1.	Kenngrößen der Verweilzeitverteilungen.....	358

11.3.2.	Idealer Rührkessel	359
11.3.3.	Ideales Strömungsrohr.....	359
11.3.4.	Ideale Rührkesselkaskade.....	359
11.3.5.	Laminar durchströmtes Rohr	360
11.4.	Reale Reaktoren	360
11.4.1.	Segregationsmodell, Null-Parameter-Modell.....	361
11.4.2.	Ein-parametrische Modelle.....	361
11.4.3.	Zwei-parametrische Modelle	363
11.5.	Bilanzierung adiabater idealer Reaktoren	364
11.5.1.	Diskontinuierlicher Rührkessel	364
11.5.2.	Ideales Strömungsrohr.....	365
11.5.3.	Idealer Rührkessel	365
11.6.	Heterogen katalysierte Reaktionen.....	366
11.6.1.	Reaktionen an festen Katalysatoren	366
11.6.2.	Diffusion mit Reaktion	367
11.6.3.	Gas-Flüssig-Reaktionen	368
11.7.	Beispiele	369
12.	Thermodynamik II.....	401
12.1.	Zustandsgleichungen	401
12.2.	Reinphasen (eine Phase, eine Komponente).....	402
12.2.1.	Anwendungen.....	403
12.3.	eine Komponente, zwei Phasen	406
12.4.	Mehrere Komponenten in einer Phase	406
12.4.1.	Mischungsgröße Δm	407
12.4.2.	Partielle molare Größen.....	407
12.4.3.	Exzessgrößen	408
12.5.	Mehrere Komponenten in zwei Phasen	410
12.5.1.	Berechnung des unsymmetrischen Aktivitätskoeffizienten.....	411
12.5.2.	Berechnung des symmetrischen Aktivitätskoeffizienten	411
12.6.	Beispiele	413
13.	Wärme-, Stofftransport II.....	432
13.1.	Stationäre, eindimensionale Wärmeleitung.....	432
13.2.	Stationäre, zweidimensionale Wärmeleitung	432
13.3.	Instationäre, eindimensionale Wärmeleitung	433
13.3.1.	endlich dicke Körper	434
13.3.2.	unendlich dicke Körper	436
13.4.	Numerische Lösungen der Wärmetransportgleichungen	437
13.4.1.	Stationäre Wärmeleitung.....	438
13.4.2.	Instationäre Wärmeleitung	440
13.5.	Beispiele:	442
14.	Thermische Trennverfahren II.....	454
14.1.	Berechnung der Kolonnenhöhe mit dem Stoffaustauschkonzept.....	454
14.1.1.	Stoffaustausch mit chemischer Reaktion.....	455
14.2.	Siede- und Taupunktberechnung	457
14.2.1.	Eine Komponente in Flüssig- und Dampfphase	457
14.2.2.	Eine Komponente in Flüssigphase, zwei Komponenten in Gasphase.....	458
14.2.3.	Zwei Komponenten in Flüssigphase, eine in Dampfphase.....	459

14.2.4.	Zwei oder mehr Komponenten in Flüssig- und Gasphase.....	459
14.2.5.	Zwei Komponenten, Gasphase und zwei flüssige Phasen.....	459
14.2.6.	Drei Komponenten, eine Gasphase und zwei flüssige Phasen	460
14.3.	Diskontinuierliche Destillation.....	461
14.3.1.	Vereinfachte Gleichgewichtsdarstellung bei der Destillation	461
14.3.2.	Einstufige diskontinuierliche Destillation	461
14.3.3.	Mehrstufige diskontinuierliche Destillation	462
14.4.	Kontinuierliche Destillation	463
14.4.1.	Berechnung der Stufenzahl ohne Wärmebilanz	464
14.4.2.	Berechnung der Stufenzahl mit Wärmebilanz.....	466
14.4.3.	Berechnung mit dem Wang-Henke-Verfahren.....	466
14.5.	Trocknung	467
14.6.	Beispiele	469
14.6.1.	Beispiele zur Absorption	469
14.6.2.	Beispiele Destillation.....	493
14.6.3.	Beispiele Adsorption	511
14.6.4.	Beispiele Extraktion	514
14.6.5.	Beispiele Trocknung.....	516
15.	Anhang	522
15.1.	Beispielverzeichnis.....	522
15.2.	Stoffdaten	532
15.3.	Dimensionslose Kennzahlen	537
15.4.	Stoffübergangs-Beziehungen	541
15.4.1.	Stoffübertragung an feste Grenzflächen	541
15.4.2.	Durchströmte Rohre	542
15.4.3.	Durchströmte Haufwerke	542
15.4.4.	Stoffübertragung an fluide Grenzflächen	543
15.4.5.	Absorption an Füllkörpern	544
15.4.6.	Absorption an Rieselfilmen in Rohren	544
15.4.7.	Absorption in Sprühtürmen	545
15.4.8.	Auflösen und Kristallisieren in Rührkesseln	545
	Symbolverzeichnis.....	544
	Literaturverzeichnis.....	549
	Sachverzeichnis.....	552